

EL FIN DE LA OMNISCENCIA:
LA RESPUESTA DE PRIGOGINE AL
PROBLEMA DE LA IRREVERSIBILIDAD
(*The End of Omniscience: Prigogine's Answer to the
Problem of Irreversibility*)

Olimpia LOMBARDI*

Manuscrito recibido: 1998.10.6.

Versión final: 1999.3.1.

* Crisólogo Larralde 3440, 6°D, 1430 Buenos Aires, Argentina.

E-mail: olimpiafilo@arnet.com.ar

BIBLID [0495-4548 (1999) 14: 36; p. 489-510]

RESUMEN: Prigogine afirma que, en presencia de alta inestabilidad (caos), los estados puntuales y las trayectorias lineales en el espacio de las fases se convierten en una falsa idealización. En el presente trabajo se sostiene que: (i) los argumentos de Prigogine en favor de tal tesis no son concluyentes, y (ii) hay buenas razones para retener la postulación de estados puntuales y trayectorias lineales, en tanto conceptos teóricos legítimos en mecánica estadística.

Descriptores: Prigogine, mecánica estadística, irreversibilidad.

ABSTRACT: *Prigogine asserts that the existence of radical instability (chaos) makes the postulation of pointlike states and linelike trajectories in phase space a false idealization. In this paper we argue that (i) Prigogine's arguments for this claim are not conclusive, and (ii) there are good reasons for retain the positing of pointlike states and linelike trajectories as a legitimate theoretical posit in statistical mechanics.*

Keywords: *Prigogine, statistical mechanics, irreversibility.*

SUMARIO

1. Introducción
 2. El fin de la omnisciencia
 3. Estados puntuales y evoluciones individuales
 4. Cambio de representación dinámica
 5. Descripción probabilística de los sistemas dinámicos
 6. Conclusiones
- Bibliografía

1. Introducción

Si bien Ilya Prigogine aborda en sus obras un amplio espectro de temáticas, no es difícil identificar su tesis central: el ser humano estructura su

experiencia según el antes y el después, de acuerdo con un tiempo que fluye en un único sentido; por el contrario, la mayor parte de la física actual postula teorías que no distinguen entre pasado y futuro. El objetivo último de Prigogine consiste en superar esta ruptura entre evidencia intuitiva y formulación científica, tendiendo el puente entre el ser y el devenir (*BB*, p. 151): su nueva síntesis permitirá, sin renegar de la tradición científica de la cual se nutre, dar sentido tanto a la experiencia íntima del fluir temporal, como a las relaciones siempre irreversibles del hombre con su entorno.

Esta tesis central se articula con problemas básicos de las diferentes esferas del saber. En el ámbito de la física, donde la termodinámica es la primera teoría que introduce la llamada "flecha del tiempo", la meta de Prigogine se concentra en el intento de completar el programa de Ludwig Boltzmann, esto es, lograr la compatibilidad entre termodinámica irreversible y mecánica reversible (*cf.* Boltzmann 1986). Basándose en el rechazo de la interpretación gnoseológica de la entropía formulada por Gibbs (1960), la estrategia consiste en fundamentar la presencia, a nivel microscópico, de una aleatoriedad intrínseca que conduce a la existencia de fenómenos intrínsecamente irreversibles. Este programa de investigación promete al físico la solución de uno de los grandes problemas que persisten en la física teórica desde fines del siglo XIX.

En el presente trabajo se formulará un análisis crítico de un aspecto del programa de Prigogine en el campo de la física: su propuesta de una reinterpretación de los conceptos básicos de la mecánica estadística; en particular, su abandono de las nociones tradicionales de estado puntual y evolución individual de un sistema en favor de una descripción *irreductiblemente* probabilística. Tal propuesta se relaciona con una perspectiva filosófica que pregona el fin de la omnisciencia y rechaza el ideal de conocimiento absoluto que, según Prigogine, ha guiado a la física moderna desde su nacimiento. El objetivo final del trabajo consiste en brindar una evaluación crítica, desde una perspectiva epistemológica, de estas tesis de Prigogine en el ámbito de la fundamentación de la mecánica estadística, tesis que pretenden suministrar una solución objetiva al viejo problema de la irreversibilidad.

2. *El fin de la omnisciencia*

El elemento que Prigogine encuentra en el núcleo mismo del paradigma clásico, mito fundador de la ciencia newtoniana, es el ideal de un conocimiento absoluto, completo, que elimina totalmente a quien lo describe, y

que mantiene en el corazón de la física la referencia a Dios, único capaz de dar sentido al conocimiento de lo real, tal como es en sí mismo (*NA*, p. 292; *TE*, p. 46). Este ideal de omnisciencia ha inspirado a los científicos desde los orígenes de la ciencia moderna, "ha fascinado a los mismos que la crearon, y les ha inspirado esta quimera de poder acceder al tipo de saber que Dios, si existiera, tendría del mundo" (*TE*, p. 36). Según Prigogine, del mito de un saber absoluto han nacido los muchos seres omniscientes que poblaron la física a lo largo de su historia: el geniecillo de Laplace, con su conocimiento de las posiciones y velocidades de todas las partículas del universo; el demonio de Maxwell, capaz de discriminar entre moléculas rápidas y moléculas lentas en un gas; el Dios de Einstein, que no jugaba a los dados con las partículas subatómicas. En este marco clásico, el alcance finito de nuestro conocimiento expresa la imperfección del hombre frente a la perfección infinita de Dios (*TE*, p. 195)¹.

Prigogine considera el diálogo entre Albert Einstein y Rabindranath Tagore como la expresión más pura del enfrentamiento entre dos concepciones del mundo y de la verdad: Einstein defendía la idea de una realidad independiente del espíritu humano, independiente de la propia existencia de los hombres sin la cual la ciencia no tendría sentido; Tagore, por el contrario, definía la realidad a la que refiere la verdad, ya sea ésta de orden científico, ético o filosófico, como relativa al espíritu humano (*cf.* *SI*, pp. 39-43). Prigogine lamenta que la visión de Einstein se haya convertido en la elección metafísica de la física desde sus inicios, y por ello se inclina decididamente hacia la perspectiva de Tagore (*TE*, p. 45). Según Prigogine, ya no es admisible la idea de realidad como algo dado, pues todo saber supone una construcción (*SI*, p. 45); en particular, el saber científico se convierte en creación de significaciones (*TE*, p. 13). La física deja de ser concebida como una actividad neutral y descarnada, para convertirse en el producto del diálogo entre el hombre y la naturaleza, en una obra que conjuga, como toda obra creadora, la libertad de la imaginación y la exploración rigurosa del mundo (*TE*, p. 22). Complejidad inabarcable mediante una única descripción, la riqueza de la realidad sobrepasa todo posible lenguaje; cada lenguaje puede expresar, si bien satisfactoriamente, únicamente parte de ella (*NA*, p. 261); los diferentes lenguajes posibles son complementarios (*NA*, p. 260) en la medida en que no es posible reducirlos a una única expresión. Por lo tanto, la tarea del científico no consiste en descubrir la verdad absoluta acerca de una realidad autónoma, sino en crear lenguajes nuevos a través de los cuales se manifiesta su capacidad de invención (*TE*, p. 23).

La multiplicidad de lo real, inasible desde un único lenguaje, irreducible a una única descripción, establece "la imposibilidad de descubrir un punto de vista divino desde el cual toda la realidad es visible simultáneamente" (NA, p. 260); el hombre ya no puede "describir la naturaleza 'desde el exterior', como mero espectador" (NA, p. 306), sino que debe integrarse al mundo que intenta comprender. Esta nueva visión de la realidad y de la ciencia impone, en consecuencia, una redefinición del concepto de objetividad (NA, p. 260): de ser entendida como ausencia de referencia al observador, la objetividad pasa a concebirse en referencia explícita al ser humano. Pero Prigogine se apresura a subrayar que el abandono de una objetividad anclada en el punto de vista divino no conduce a la caída en el subjetivismo; los conceptos de la ciencia son objetivos en tanto son independientes del observador y dependientes únicamente de las condiciones que definen cualquier observación (TE, p. 195). Esta nueva objetividad permite escapar a la alternativa entre el ideal de conocimiento omnisciente y un irracionalismo producto del subjetivismo o una concepción meramente pragmática del saber (TE, p. 46)². Prigogine considera esta inversión del paradigma clásico como una *revolución kepleriana*, por oposición a las revoluciones copernicanas que mantienen la idea de un punto de vista absoluto (NA, p. 302).

El fin de la omnisciencia, nuestro doble papel de actores y espectadores en el mundo, termina por delinear una imagen filosófica que el propio Prigogine caracteriza como idealismo (NA, p. 306). Al evaluar el idealismo trascendental kantiano, Prigogine adhiere precisamente al aspecto idealista de la doctrina, esto es, el papel activo del sujeto en la constitución del conocimiento (NA, p. 123). El aspecto inaceptable para Prigogine es el carácter trascendental de la filosofía kantiana: mientras para Kant las categorías del entendimiento son constitutivas del sujeto trascendental, Prigogine hace depender los esquemas categoriales del peculiar contexto histórico-social que los produce³.

Desde esta concepción del conocimiento, ¿qué papel cumple la irreversibilidad? La evidencia del tiempo irreversible dictada por el sentido común y recogida por la filosofía parece encontrarse en un plano diferente al de cualquier otro conocimiento: con la nueva ciencia del devenir, "la significación de la irreversibilidad sufre una mutación radical. De apariencia ligada a un conocimiento imperfecto la hemos visto convertirse en condición misma de todo conocimiento" (TE, p. 208). Es decir, respecto del conocimiento, la irreversibilidad temporal deja de representar un contenido para adquirir un carácter formal, pues sin el devenir el ser no sería

cognoscible (*TE*, p. 205). La flecha del tiempo ya no es lo que debe ser explicado (*TE*, p. 207), sino que se impone previamente a toda descripción, como condición incondicionada de todos los objetos de la física (*TE*, p. 209).

Pero esta irreversibilidad temporal que da sentido a nuestras vidas, ¿es una categoría impuesta por nuestra cultura, o un elemento propio de la especificidad humana? Prigogine insiste en la necesidad de reconocer "la diferencia intrínseca entre el pasado y el futuro sin la cual no podemos pensar, ni hablar ni actuar" (*TE*, p. 209); si la irreversibilidad del tiempo está inscrita en nuestro pensamiento, en nuestro lenguaje y en nuestro comportamiento en tanto humanos, no resulta una imposición de nuestra cultura históricamente situada, sino que se presenta como un elemento constitutivo del hombre, previo a toda determinación histórica. Por esta razón, Prigogine considera inconcebible desconocer la irreversibilidad y se pregunta cómo fue posible para la física clásica negar una evidencia tan abrumadora que ninguna cultura había puesto en cuestión hasta entonces (*TE*, p. 14). La presencia de este elemento *a priori* permite comprender cómo Prigogine puede afirmar que la ciencia moderna, en resonancia cultural con su propia época, generó, no obstante, resultados inaceptables para todos los universos culturales, incluso el que los produjo (*NA*, p. 34): la física newtoniana niega el único elemento de validez transcultural, presente en todo posible esquema categorial; la irreversibilidad temporal es una propiedad ineludible de la naturaleza, no por pertenecer a la realidad en sí misma, sino por ser una categoría esencial e invariante del sujeto que constituye tal naturaleza en cada época y en cada cultura. Este modo de concebir la irreversibilidad temporal permite también comprender la angustia y la alienación del hombre frente a una ciencia que niega precisamente aquello que no puede ser negado⁴. Prigogine integra, así, un único elemento trascendental que escapa a toda determinación histórica; su reconocimiento es la meta que se propone alcanzar, y a ello dirige todos sus esfuerzos científicos y filosóficos.

3. Estados puntuales y evoluciones individuales

Prigogine se pregunta: ¿cómo concebir el devenir en un mundo de trayectorias deterministas y reversibles? El ideal de omnisciencia se encarna en el genio de Laplace, que contempla el universo en un instante y calcula su evolución para toda la eternidad. Pero, según Prigogine, la evolución precisa de un sistema, que parece tan real, es de hecho una idealización: nunca la

observamos tal como es, pues para ello sería necesario una observación de precisión infinita, que atribuyera al sistema dinámico una condición inicial puntual, un estado único con exclusión de cualquier otro estado indefinidamente cercano a él.

Prigogine sostiene que, para cierto tipo de sistemas mecánicos, la determinación infinitamente precisa de las condiciones iniciales corresponde a un proceso auto-contradictorio (*NA*, p. 267); en consecuencia, las nociones de evolución individual y de estado puntual pierden su sentido (*TE*, p. 202, p. 301). Esto sucede, en particular, en el caso de los sistemas denominados "caóticos", donde las evoluciones que se inician en condiciones iniciales arbitrariamente próximas divergen exponencialmente con el tiempo, es decir, presentan una fuerte inestabilidad. Por lo tanto, las pequeñas incertidumbres en la determinación del estado inicial de un sistema caótico se amplifican exponencialmente con el tiempo de modo tal que, luego de un intervalo suficientemente largo, la predicción unívoca de los estados futuros del sistema resulta totalmente imposible. Desde luego, si pudiéramos observar un sistema caótico durante un tiempo indefinidamente largo, sabríamos qué evolución describe. Pero dado que observar un sistema durante un período no limitado de tiempo y predecir su evolución son actividades incompatibles, según Prigogine "la asociación de las dos actividades es en sí misma una reducción al absurdo de la idea de predicción determinista" (*NA*, p. 270).

Es importante señalar que este rechazo de las nociones de evolución individual y estado puntual no se debe a una profunda modificación de las leyes básicas de la mecánica, sino a una reinterpretación de la teoría basada en el hecho de que no es posible la determinación empírica infinitamente precisa del estado inicial, lo cual impide la predicción unívoca de la trayectoria según la cual evoluciona el sistema: "no *conocemos* nunca un estado inicial con el grado infinito de precisión que haría falta para reducirlo a un punto único" (*NA*, p. 235; *itálica* nuestra); por lo tanto, "después de un tiempo de evolución grande (...), el *conocimiento* que teníamos del estado inicial del sistema ha perdido su pertinencia y ya no nos permite determinar su trayectoria" (*TE*, p. 85; *itálica* nuestra). Para los sistemas caóticos, su estado puntual y su trayectoria individual se convierten en inobservables en el sentido estricto del término (*NA*, p. 269): no sólo son idealizaciones, sino idealizaciones inadecuadas (*NA*, p. 301).

En efecto, en los sistemas caóticos la mejor predicción es probabilística. Pero el núcleo de la cuestión reside en la interpretación adjudicada a la probabilidad en estos casos. Si la descripción probabilística es consecuen-

cia de la amplificación exponencial de las imprecisiones en la determinación empírica de las condiciones iniciales, la posición más natural consiste en interpretar la probabilidad como medida de la ignorancia del observador acerca del estado preciso en el que se encuentra el sistema. Tomemos, por ejemplo, el caso de una mesa de billar cuyos contornos imponen a la bola un comportamiento caótico⁵. Si, en lugar de fijar un estado puntual -posición y velocidad- como condición inicial del movimiento de la bola, se asigna una distribución de probabilidades, para tiempos suficientemente largos tal distribución se extenderá uniformemente sobre todas las posiciones correspondientes a la mesa; esto implica que ya no puede predecirse el estado preciso del sistema dentro de un margen acotado de error; en esta situación puede decirse que la evolución es irreversible *en la práctica*, pues se desconoce el estado a partir del cual la evolución podría invertirse reconduciendo el sistema a su estado inicial temporalmente invertido. Sin embargo, en todo instante la bola se encontrará en una posición definida con una velocidad definida -el sistema se encontrará en un estado puntual particular-, y la secuencia de tales valores constituye su evolución individual, esto es, su trayectoria en el espacio de las fases⁶; esto se cumple aún cuando, para instantes muy posteriores al inicial, no podamos predecir el estado de la bola dentro de un margen acotado de error.

Este ejemplo muestra la importancia de distinguir entre los conceptos de *determinismo* y de *predictibilidad*. El carácter determinista de un dado sistema refiere a la secuencia objetiva unívoca de sus estados físicamente posibles; en este sentido, los sistemas caóticos resultan totalmente deterministas (*cf.* Lombardi 1998), y ello permite su reversibilidad, definida en el plano ontológico. Por el contrario, predictibilidad es un concepto gnoseológico que alude al máximo conocimiento que puede obtenerse acerca de los estados futuros de un sistema. Pero el determinismo, en el sentido ontológico que aquí se adopta, no implica la posibilidad de predicción unívoca: los sistemas caóticos con su alta inestabilidad, o los sistemas de muchos grados de libertad como los que trata la mecánica estadística clásica, son ejemplos paradigmáticos de sistemas que, si bien describen evoluciones deterministas, en la práctica no permiten predecir unívocamente sus estados precisos luego de un tiempo de evolución suficientemente largo. Por lo tanto, impredecibilidad no implica indeterminismo; precisamente a ello se refería Laplace cuando, en el famoso pasaje de su *Théorie Analytique des Probabilités*, admitía la infinita distancia entre la mente humana y la inteligencia superior capaz de inferir el futuro a partir del estado actual del universo y de las leyes newtonianas deterministas. En

consecuencia, la irreversibilidad que Prigogine infiere del crecimiento exponencial de las imprecisiones en los sistemas caóticos hereda el carácter gnoseológico de la impredecibilidad sobre la cual se funda.

En otras palabras, al fundamentar la irreversibilidad "intrínseca" de los sistemas dinámicos caóticos en la amplificación exponencial de la incertidumbre respecto del estado preciso del sistema, Prigogine incurre en una inaceptable transposición de planos que le permite inferir conclusiones ontológicas a partir de consideraciones exclusivamente gnoseológicas. Esta misma transposición de planos se manifiesta en su análisis de la transformación del panadero⁷: mientras la evolución de un punto es totalmente determinista y reversible, luego de un tiempo de evolución suficientemente largo cualquier zona inicial de superficie no nula termina "cubriendo" todo el espacio de las fases accesible al sistema, situación que se identifica con el equilibrio (*cf.* EC, pp. 204-206); de aquí Prigogine concluye la aleatoriedad *intrínseca* de la transformación, así como el carácter *intrínsecamente* irreversible de su evolución hacia el equilibrio. No obstante, tanto en este caso como en el de la bola de billar, si conociéramos con total precisión las condiciones iniciales del sistema, las ecuaciones caóticas permitirían calcular su estado para todo tiempo posterior y, con ello, podría recalcularse el estado inicial a partir de cualquier estado futuro.

Pero, ¿acaso no anuncia Prigogine el fin de la omnisciencia?, ¿no pregona el advenimiento de una nueva objetividad que prescindiera del conocimiento infinitamente preciso que sólo Dios podría alcanzar? Desde esta concepción del saber científico, Prigogine se empeña por demostrar que la combustión que tiene lugar en el horno no es producto de nuestra ignorancia, sino que constituye un proceso objetivamente irreversible de la naturaleza. Pero, ¿objetivo para quién?; no para el ojo de Dios, pues hemos prescindido de él. Tal vez deba concebirse la objetividad en términos de un objeto constituido, a la manera kantiana, por las categorías propias del entendimiento humano, entre las cuales se encontraría la irreversibilidad temporal. El problema es que los argumentos de Prigogine brindan mucho menos que esto: en los sistemas caóticos, la irreversibilidad que resulta de las imprecisiones empíricas iniciales no logra ser objetiva siquiera en este sentido trascendental de objetividad, pues no se manifiesta del mismo modo para cualquier observador humano dotado de una capacidad finita de discriminación empírica. Por el contrario, se trata de una irreversibilidad que conduce al equilibrio a una velocidad tanto menor cuanto mejores y más precisos sean los poderes de discriminación de *cada observador particular*⁸. Insistir en la atribución de un carácter objetivo a propiedades con

este tipo de dependencia respecto de cada situación particular de observación vacía prácticamente de contenido al concepto de objetividad: incluso la interpretación de Gibbs del aumento de entropía resultaría ser "objetiva" en este sentido. Si, por el contrario, no admitimos disolver el concepto de objetividad, la propuesta que nos ofrece Prigogine no parece alejarse demasiado de la interpretación gnoseológica de Gibbs que tanto se empeña por rechazar: también aquí la irreversibilidad se presenta como resultado de nuestros poderes finitos de discriminación.

4. Cambio de representación dinámica

Prigogine no se limita a formular consideraciones generales acerca de la irreversibilidad intrínseca, sino avanza hacia el nivel teórico-formal en sus trabajos estrictamente científicos, proponiendo un cambio de representación que convierte la evolución clásica en un proceso probabilístico, intrínsecamente indeterminista e irreversible.

Dado un sistema mecánico, su estado en todo instante queda determinado unívocamente por las condiciones iniciales de las cuales partió la evolución. Un sistema termodinámico cerrado, por el contrario, evoluciona hacia el equilibrio desde cualquier condición inicial, "olvidando" su pasado⁹. Prigogine asocia esta "pérdida de memoria" de los sistemas termodinámicos cerrados con las propiedades de ciertos procesos probabilísticos conocidos como *procesos de Markov*, cuya característica definitoria viene dada por el hecho de que las probabilidades de transición entre estados resultan *independientes de la historia previa del sistema* (OC, p. 236). En un proceso de Markov, la probabilidad de transición entre dos estados v y w involucra únicamente dichos estados, esto es, no depende en absoluto de los estados previos a la ocurrencia del estado v . La estrategia general de Prigogine consiste en demostrar la equivalencia entre algunas evoluciones dinámicas deterministas -en particular, evoluciones que manifiestan la alta inestabilidad propia de los sistemas caóticos- y cierto tipo de procesos de Markov, cuyo carácter probabilístico asegura su irreversibilidad. Tal equivalencia se manifiesta en la posibilidad de efectuar un *cambio de representación dinámica* del sistema, que convierte la tradicional descripción determinista en la descripción esencialmente probabilística que caracteriza a los procesos de Markov.

La evolución dinámica de un sistema determinista y conservativo puede describirse mediante un operador U_t que actúa sobre la función de distribución ρ , de modo tal que la distribución en un instante t resulta

de la aplicación de U_t sobre la distribución en el instante inicial $t=0$: $\rho(t)=U_t\rho(0)^{10}$. La nueva representación propuesta por Prigogine reemplaza la tradicional función de distribución ρ , que evoluciona según un proceso determinista y conservativo, por una nueva función de distribución ρ^* , que evoluciona según un proceso de Markov asociado a un operador W_t : $\rho^*(t)=W_t\rho^*(0)^{11}$. A fin de conectar ambas representaciones, es necesario construir una transformación Λ tal que, para una dada función de distribución ρ que evoluciona determinísticamente según U_t , permita definir una función de distribución $\rho^*=\Lambda\rho$ que evoluciona probabilísticamente según W_t . La transformación Λ debe cumplir ciertas condiciones para asegurar la equivalencia entre ambas representaciones y para que la nueva distribución ρ^* resulte físicamente posible¹². Si tales condiciones se cumplen, puede demostrarse que $W_t=\Lambda U_t\Lambda^{-1}$ y $U_t=\Lambda^{-1}W_t\Lambda^{13}$; según Prigogine, estas identidades, que permiten obtener W_t a partir de U_t y viceversa, expresan la equivalencia entre ambas representaciones:

desde este punto de vista, la teoría probabilística es una 'imagen' de la dinámica mediada por la transformación Λ . Inversamente, la dinámica subyacente al proceso de Markov se recobra una vez que somos capaces de identificar Λ . (EC, p. 200)

¿Cómo se manifiesta formalmente la irreversibilidad en esta nueva representación? El operador W_t no se comporta de igual manera para $t \geq 0$ que para $t < 0$. Para $t \geq 0$, W_t preserva positividad, es decir, aplicado a distribuciones $\rho^*(0)$ positivas -físicamente posibles- da como resultado distribuciones $\rho^*(t)$ también positivas; esto significa que, para $t \geq 0$, W_t representa una evolución físicamente posible. Por el contrario, W_t no preserva positividad para $t < 0$; en otras palabras, W_{-t} , que resulta de la inversión temporal sobre W_t , no representa una evolución físicamente posible. Para Prigogine, la ruptura de la simetría temporal se ubica, precisamente, en el hecho de que W_t preserva positividad sólo para $t \geq 0$ y no para $t < 0$ ¹⁴.

Pero, además, los procesos de Markov que interesan a Prigogine son aquéllos que manifiestan la irreversibilidad expresada por el segundo principio: W_t debe describir un acercamiento irreversible al equilibrio; es decir, la distribución correspondiente al equilibrio ρ^*_{eq} debe ser un macroestado atractor para el proceso¹⁵. Si esta condición se cumple, se demuestra que puede construirse una función $H^*(\rho^*)$ que, a diferencia de la función $H(\rho)$ original de Boltzmann, decrece monótonamente con el tiempo: $H^*(\rho^*(t))-H^*(\rho^*(0)) \leq 0$ ¹⁶. Esta nueva función $H^*(\rho^*)$, cambiada de signo, representa la entropía del sistema que, como afirma el segundo principio, aumenta monótonamente con el tiempo hasta alcanzar su valor máximo en

el equilibrio. Según Prigogine, de este modo "hemos llegado a nuestra meta (...) de obtener una formulación microscópica del segundo principio de la termodinámica" (EC, p. 209).

Pero, ¿para qué tipo de sistemas puede construirse la transformación Λ ? Los sistemas dinámicos para los cuales tal construcción puede ser efectivamente realizada son aquéllos que manifiestan una alta inestabilidad; en particular, Prigogine concentra su atención en la dinámica descrita por la transformación del panadero, cuyo carácter caótico asegura el grado requerido de inestabilidad. En efecto, Prigogine construye explícitamente la transformación Λ para el caso de la transformación del panadero, y obtiene la nueva función de distribución ρ^* ; mediante ρ^* demuestra la posibilidad de definir la entropía a través de $H^*(\rho^*)$ monótonamente decreciente con el tiempo (EC, pp. 205-209). En resumen,

la transformación del panadero es conservativa, reversible, recurrente y caótica (...). Es sorprendente que, a pesar de la reversibilidad y la recurrencia, la propiedad de caoticidad nos permite establecer una genuina irreversibilidad mediante la construcción, sin la introducción de aproximación alguna, de una descripción más adecuada. (EC, p. 203)

De este modo Prigogine define el concepto de *aleatoriedad intrínseca*: los sistemas intrínsecamente aleatorios son aquéllos para los cuales es posible construir la transformación Λ que conecta su evolución dinámica con un proceso de Markov indeterminista e irreversible.

"Sin la introducción de aproximación alguna": según Prigogine, la equivalencia entre la evolución dinámica original y el proceso probabilístico de Markov pone de manifiesto que el comportamiento aleatorio e irreversible puede surgir a partir de una dinámica determinista y reversible sin necesidad de introducir supuestos acerca del "grano grueso" (*coarse grain*) de la descripción ni consideraciones relacionadas con la mecánica cuántica. Desde su perspectiva, aleatoriedad e irreversibilidad son propiedades intrínsecas e irreductibles, generadas por la dinámica propia del sistema y no el resultado de la introducción de la ignorancia por parte del observador:

En este trabajo hemos demostrado (...) (para una clase especial de sistemas dinámicos abstractos) que la descripción probabilística puede ser conectada con la descripción determinista mediante un 'cambio de representación' a través de una transformación que *no involucra pérdida de información*. (DD, p. 24)

5. Descripción probabilística de los sistemas dinámicos

La teoría acerca del cambio de representación dinámica puede formularse sin inconvenientes sobre la base de la mecánica estadística en su interpretación tradicional; sin embargo, Prigogine pretende avanzar un paso más hacia la fundamentación de la irreversibilidad temporal proponiendo una radical reinterpretación de los conceptos básicos de la mecánica estadística: la relación entre mecánica reversible y termodinámica irreversible exigiría una profunda revisión del modo de descripción de los sistemas mecánicos, revisión que nada tiene que ver con las tradicionales cuestiones asociadas a la mecánica cuántica. Según Prigogine, para los sistemas altamente inestables donde el cambio de representación es posible, los conceptos mismos de microestado y evolución temporal, o de punto y trayectoria en el espacio de las fases, dejan de ser significativos, incluso como idealizaciones:

En nuestra opinión, esta limitación del concepto de trayectoria en el espacio de las fases implicado por la inestabilidad del movimiento, no es una mera limitación práctica sino que tiene un carácter *conceptual*. Esto hace conceptualmente necesario dejar de lado las idealizaciones no físicas de puntos representativos y trayectorias, y avanzar hacia una descripción probabilística de los estados físicos en términos de regiones abiertas del espacio de las fases. (*TPD*, p. 23)

Para evaluar el alcance de la revisión propuesta por Prigogine conviene recordar cómo se define la función de distribución ρ en la interpretación tradicional de Gibbs: ρ describe la densidad de distribución de los puntos que representan los microestados de cada sistema del *ensemble* correspondiente al sistema real bajo estudio; los sistemas del *ensemble* se seleccionan de modo tal que cada uno de ellos se encuentre en un microestado diferente, pero siempre compatible con nuestro conocimiento parcial respecto del sistema real, esto es, con su estado macroscópico. Normalizada a la unidad, ρ representa una distribución de probabilidades que brinda, para cada punto del espacio de las fases, la densidad de probabilidad de que el sistema bajo estudio se encuentre en el microestado representado por dicho punto. No obstante la fecundidad teórica que esta interpretación tradicional de la mecánica estadística ha demostrado desde su formulación, según Prigogine debe ser abandonada en el caso de sistemas altamente inestables: con independencia de toda consideración a fenómenos cuánticos, la mecánica estadística por sí misma impone, en presencia de alta inestabilidad, limitaciones a sus propios conceptos fundamentales.

Desde esta perspectiva, Prigogine interpreta el cambio de representación operado por la transformación Λ : los nuevos estados $\rho^* = \Lambda\rho$ que evolucionan bajo W_t se convierten en los "verdaderos" estados del sistema; la transformación $\rho \rightarrow \rho^*$ "corresponde a la descripción de los estados físicos en términos de nuevas entidades elementales, diferentes de las entidades en términos de las cuales se formula la descripción dinámica original" (*IN*, p. 422). Según Prigogine, el carácter probabilístico e irreversible de la nueva representación es *irreductible* pues no surge de una descripción de grano grueso (*NA*, p. 278); la irreversibilidad intrínseca es generada por la propia dinámica del sistema, y no es resultado de la introducción de la ignorancia por parte del observador. La supuesta irreductibilidad de la nueva representación conduce a Prigogine a establecer una "profunda analogía" (*TE*, p. 153) entre mecánica cuántica y dinámica clásica en situaciones de alta inestabilidad:

La mecánica cuántica y la dinámica de los sistema inestables se separan de la dinámica de trayectorias por razones opuestas. En el caso inestable, las trayectorias estaban demasiado "desordenadas", demasiado "independientes"; por el contrario, en el caso cuántico las trayectorias vecinas son correlativas, no pueden ser separadas. Pero en ambos casos la noción de punto en el espacio de las fases no tiene ya ningún significado. (*NA*, p. 292)

Pero esta analogía con la mecánica cuántica en lo que se refiere a la irreductibilidad de la descripción probabilística resulta, como mínimo, bastante dudosa. En mecánica cuántica, las probabilidades no surgen como resultado de una dinámica subyacente; la función de onda, que describe la evolución temporal de un sistema individual, fija las probabilidades a través del cuadrado de su amplitud; la propia estructura matemático-formal de la teoría excluye la posibilidad de representar un microestado cuántico mediante un punto en el espacio de las fases (*cf.* Hughes 1994). En mecánica estadística, por el contrario, la existencia de los microestados del sistema se presupone en la construcción misma del espacio de las fases, espacio que constituye el escenario formal donde se representan las funciones de distribución y sus evoluciones temporales. Algunos autores caracterizan la diferencia entre ambas teorías en términos de prueba de inexistencia de variables ocultas (*cf.* Batterman 1991, p. 256; Sklar 1993, p. 365): mientras en mecánica cuántica diferentes resultados señalan la imposibilidad de interpretar la teoría en términos de *ensembles* que expresen nuestra ignorancia respecto de un microestado "oculto" pero preciso¹⁷, la mecánica estadística clásica es el paradigma de teoría de variables ocultas: cualquier cambio de representación no impide que la descripción tradicional -en

términos de puntos y trayectorias en el espacio de las fases- exista y siga brindando resultados admirablemente confirmados. Un argumento adicional contra la analogía entre ambas teorías es el que brinda el fenómeno de superposición: en mecánica estadística, las probabilidades representadas por la función de distribución cumplen con todas las propiedades impuestas por el cálculo de probabilidades tradicional; en mecánica cuántica, en cambio, las probabilidades no son aditivas sino que manifiestan una superposición similar a la de las ondas físicas, lo cual permite que se produzca el fenómeno de interferencia. Esta peculiaridad de la "probabilidad cuántica" constituye un fuerte motivo para interpretar la función de onda como descripción irreductible de un sistema individual; nada parecido sucede en mecánica estadística, donde la probabilidad puede ser cómodamente interpretada como medida de la ignorancia.

Si la mecánica estadística no puede identificarse con la mecánica cuántica en cuanto a la irreductibilidad de la descripción probabilística, la pregunta que surge de inmediato es: ¿desde qué perspectiva epistemológica propone Prigogine tan radical revisión? Tal vez su renuncia a los conceptos de estado puntual y evolución individual responda a una posición fuertemente instrumentalista que niega toda referencialidad a los términos teóricos de la ciencia; desde tal perspectiva, el carácter inobservable (NA, p. 269) de tales estados y evoluciones podría interpretarse como un argumento en favor del abandono de los conceptos respectivos. Sin embargo, aún desde un instrumentalismo extremo, la utilización de términos teóricos es un recurso legítimo si permite la construcción de una teoría predictivamente exitosa; en este sentido, los conceptos cuestionados resultan admisibles en la medida en que intervienen en una teoría como la mecánica estadística, cuya éxito predictivo no es puesto en duda. Sólo un empirista radical, que pretendiera eliminar del discurso científico todo término teórico persiguiendo el ideal de un lenguaje científico puramente observacional, podría exigir la renuncia a todo término que denotara inobservables, con independencia de su fecundidad predictiva. Pero los inconvenientes de esta perspectiva son suficientemente conocidos: el empirismo radical, no sólo queda desmentido por la propia actividad científica que, desde la modernidad, jamás ha prescindido del nivel teórico de descripción, sino que olvida el papel central que cumple la idealización en la física desde Galileo. Además, tal posición resulta totalmente incompatible con la aceptación, nunca cuestionada por el propio Prigogine, de términos referidos a entidades inobservables en otras áreas de la física; ejemplo de ello es la continua alusión a átomos o electrones en las discusiones acerca de la me-

cánica cuántica, donde Prigogine rechaza explícitamente las interpretaciones subjetivistas e instrumentalistas de la teoría.

Pero Prigogine no limita sus argumentos a la comprobación de analogías ni a cuestiones epistemológicas, sino que avanza sobre el terreno teórico-formal, señalando lo que denomina "propiedad de *delocalización*" de la transformación Λ sobre la función de distribución ρ (IN, pp. 421-429). Supóngase una distribución ρ , cuyo soporte se encuentra confinado inicialmente en una región Γ_0 , que representa el macroestado inicial de un sistema fuera del equilibrio; según la mecánica estadística tradicional, en $t=0$ será $\rho(0)=\text{constante}$ en Γ_0 y $\rho(0)=0$ en el resto del espacio de las fases; es decir, la probabilidad de que el sistema se encuentre en un microestado representado por un punto perteneciente a Γ_0 es igual a 1, y es igual a 0 la probabilidad de que se encuentre en cualquier otro microestado. Pero en la nueva representación, $\rho^*(0)=\Lambda\rho(0)$ adoptará valores no nulos sobre toda la subregión Γ_E compatible con el macroestado final de equilibrio del sistema: por lo tanto, ρ^* puede interpretarse como una densidad de probabilidad extendida no uniformemente sobre Γ_E . Este efecto delocalizador de Λ sobre ρ constituye, para Prigogine, una razón más para abandonar el concepto de microestado en favor de las "nuevas entidades elementales" ρ^* (IN, p. 422). Pero, ¿qué son físicamente estas "nuevas entidades elementales"? ¿qué representa ρ^* , cómo se relaciona con el macroestado de un sistema *individual*, si los microestados han sido eliminados?

A fin de reforzar su posición, Prigogine demuestra, para el caso particular de la transformación del panadero, que el efecto delocalizador de la transformación Λ se manifiesta incluso sobre distribuciones ρ de medida nula; en particular, una distribución representada por una δ -Dirac concentrada en un único punto del espacio de las fases resulta delocalizada bajo la acción de Λ , convirtiéndose en un objeto "extendido": "incluso si se pudiera partir con una condición inicial pura correspondiente a un punto del espacio de las fases, ésta no continuaría siendo un punto bajo la transformación Λ " (IN, p. 422). De aquí, Prigogine concluye que

los objetos básicos de la teoría no deben ser ya los puntos del espacio de las fases y sus evoluciones dinámicas a lo largo de trayectorias en dicho espacio, sino la transformación de puntos bajo la transformación Λ y su evolución bajo W_t . (IN, p. 425)

¿Demuestra este nuevo argumento la necesidad de abandonar la descripción mediante puntos en favor de una representación en términos de "transformación de puntos"?

La debilidad de la estrategia argumentativa de Prigogine reside en el sutil desplazamiento entre la afirmación acerca de la aplicación de Λ a una condición inicial *correspondiente a un punto* del espacio de las fases y la conclusión acerca de la *transformación de puntos* del espacio de las fases. La transformación Λ no se aplica sobre puntos sino sobre funciones de distribución ρ^{18} ; por lo tanto, mientras la primera afirmación es correcta, la referencia a "transformación de puntos" con la que concluye el argumento carece de sentido, en la medida en que los puntos no son el tipo de entidades matemáticas a las que pueda aplicarse Λ . Incluso una distribución de medida nula como lo es la correspondiente a una δ -Dirac concentrada en un punto representa un *ensemble* y, por tanto, no puede identificarse con un punto del espacio de las fases. Por lo tanto, aún aceptando el efecto delocalizador de Λ sobre las particulares distribuciones iniciales de medida nula, nada impide retener el concepto de punto representativo del microestado de un sistema individual, sobre el cual el efecto delocalizador de Λ y sus consecuencias de carácter estadístico no se aplican. En este sentido, Robert Batterman señala que, si bien Prigogine niega significado a los puntos del espacio de las fases, lo hace considerando las propiedades de las distribuciones análogas a puntos; pero tales distribuciones

no son puntos y, en consecuencia, su argumento en favor de tan fuerte conclusión ontológica pierde mucho de su fuerza. Los teóricos clásicos que deseen continuar siendo realistas respecto a estados exactos y trayectorias precisas pueden no sentirse terriblemente afectados por el argumento. (Batterman 1991, p. 260)

En consecuencia, aún si pudiera brindarse alguna interpretación física a las "entidades elementales" delocalizadas de la nueva descripción -interpretación que Prigogine no nos ayuda a elucidar-, el efecto delocalizador de Λ no afecta la descripción del sistema en términos de su microestado preciso y su evolución temporal única, en la medida en que Λ no se aplica a dicha descripción: se trata de *dos niveles de descripción distintos*, y no hay aún prueba suficiente de que debamos prescindir totalmente de uno de ellos.

Pero no sólo no hay prueba suficiente de que debamos prescindir de la descripción de un sistema clásico en términos de estados puntuales y evoluciones individuales, sino que hay buenas razones para no abandonar tal nivel de descripción. La necesidad de abandonar los conceptos de punto y trayectoria en el espacio de las fases se impondría únicamente en los casos de alta inestabilidad, donde la transformación Λ puede ser efectivamente construida; pero la descripción en términos de puntos y trayectorias continúa siendo válida en situaciones estables, en las cuales tiene sentido pregun-

tarse por los estados precisos del sistema a lo largo de su evolución temporal. Este es un fuerte motivo para retener el sentido tradicional de los conceptos de punto y trayectoria en el espacio de las fases: el estado puntual del sistema y su evolución precisa son reales, si bien en los casos de alta inestabilidad nos resulta imposible predecir unívocamente todos los estados futuros dentro de un margen acotado de error.

Un problema aún mayor para la perspectiva de Prigogine es el que introducen ciertos experimentos físicos que muestran la evolución antientrópica de un sistema; éste es el caso de los experimentos de *eco-spin*. En una red cristalina, los spines de los núcleos se alinean en el instante inicial por la acción de un fuerte campo magnético aplicado exteriormente; luego se deja evolucionar el sistema de modo tal que los spines "roten" libremente; debido a las inhomogeneidades del cristal, las velocidades de rotación varían de núcleo a núcleo, de modo tal que, para $t=\Delta t$, las direcciones de los spines se encuentran distribuidas aleatoriamente en una situación que corresponde al macroestado de equilibrio del sistema. En $t=\Delta t$ se aplica un pulso de radio que produce sobre los núcleos el efecto equivalente a la inversión de velocidades de rotación; lo asombroso de la experiencia es que, para $t=2\Delta t$, los spines recobran su alineación original correspondiente a la condición inicial "ordenada" de no equilibrio. Estos resultados han sido repetidamente obtenidos bajo distintas condiciones experimentales, e incluso en situaciones donde los núcleos interactúan magnéticamente entre sí. A diferencia de las simulaciones numéricas por computadora, los experimentos de *eco-spin* sí se aproximan notablemente a la realización del experimento mental de la inversión de velocidades, confirmando la predicción de Loschmidt -en contra de las conclusiones de Prigogine basadas en simulaciones numéricas (cfr. *TE*, p. 109)-: ante una inversión de las velocidades, el sistema evolucionará disminuyendo su entropía hasta recobrar su estado inicial de no equilibrio. Pero lo relevante aquí es señalar que la posibilidad de aplicar una inversión de velocidades a los elementos del sistema permite inferir la existencia de un microestado preciso -sobre el cual se efectúa la inversión- que conserva la "memoria" del microestado inicial, de un modo totalmente compatible con una dinámica microscópica reversible. Es difícil concebir cómo podrían explicarse los resultados de los experimentos de *eco-spin* si se prescindiera por completo de la noción de estado puntual y evolución temporal individual.

6. Conclusiones

En el presente trabajo se ha examinado la propuesta de Prigogine de prescindir de las nociones de microestado y microevolución en mecánica estadística, propuesta basada en una posición filosófica que pregona el fin de la omnisciencia. Este análisis ha mostrado que tal propuesta no se justifica: (i) ni desde su propia perspectiva epistemológica, la cual no se identifica en modo alguno con un empirismo radical; (ii) ni desde un punto de vista físico, en la medida en que no se brinda una adecuada interpretación de las nuevas nociones que deberían reemplazar los conceptos tradicionales. Por otra parte, hay buenas razones para no abandonar los conceptos de punto y trayectoria en el espacio de las fases, dado que ellos continúan brindando explicaciones adecuadas en casos de estabilidad o en sistemas que describen evoluciones antientrópicas.

Si la radical reinterpretación de los conceptos básicos de la mecánica estadística que propone Prigogine se considera poco plausible, ¿ello invalida el resto de su propuesta teórica? Con su insistencia en la necesidad de abandonar las tradicionales nociones de punto y trayectoria en el espacio de las fases para la descripción de los sistemas físicos, Prigogine parece considerar que tal posición es indispensable para fundamentar una irreversibilidad intrínseca que permita escapar a la interpretación gnoseológica del segundo principio. Sin embargo, su teoría acerca del cambio de representación que conduce a la ruptura de la simetría temporal no depende, en realidad, de una revisión conceptual tan radical como la propuesta: tal teoría puede formularse sin inconvenientes sobre la base de la interpretación tradicional de la mecánica estadística. Incluso, esta reinterpretación de los conceptos básicos de la mecánica estadística en nada contribuye a resolver ciertas limitaciones de su propuesta teórica respecto de la explicación de la asimetría temporal ya señaladas por algunos críticos (*cf.* Karakostas 1996; Lombardi 1999); pero la evaluación crítica de este aspecto de los aportes de Prigogine excede el objetivo del presente trabajo, en tanto tales limitaciones no dependen conceptualmente de la aceptación o no de las nociones de estado puntual y evolución individual de un sistema.

Notas

- ¹ Prigogine señala una cierta "resonancia" entre el discurso teológico y la ciencia moderna en sus orígenes (NA, p. 73): el mundo-reloj es una metáfora que remite a un Dios Relojero, ordenador racional de una naturaleza mecánica y pasiva, esencialmente extraña a la libertad y a la finalidad del espíritu humano.
- ² Es interesante notar los puntos de contacto entre el pensamiento de Prigogine y el *realismo internalista* de Hilary Putnam (1988), que pretende resolver el tradicional enfrentamiento entre objetivismo y subjetivismo: el fin de la omnisciencia que pregona Prigogine puede asimilarse a la impugnación de la perspectiva del Ojo de Dios en Putnam; la necesidad de redefinir el concepto de objetividad también es común a ambos autores.
- ³ Según Prigogine, las ciencias son un elemento inescindible de la cultura de una época, "no pueden separarse de la aventura humana. Ellas (...) participan de la creación de sentido con el mismo título que el conjunto de las prácticas humanas" (TE, p. 212); a su vez, "la cultura es profundamente histórica, tejida de relatos referentes al pasado" (TE, p. 75). En este sentido, las ciencias naturales no se diferencian de las ciencias sociales: ambas son el resultado de su propio contexto cultural y no pueden olvidar su "arraigo social e histórico" (NA, p. 309).
- ⁴ A lo largo de su obra, Prigogine insiste en la angustia y la alienación producto de la ciencia heredera de la física newtoniana. La ciencia moderna enfrenta al hombre a un "dilema metafísico" (NA, p. 56), obligándolo a escoger entre el rechazo irracionalista de la actividad científica, inaceptable y amenazante, y la decisión trágica de asumir sus conclusiones alienantes. Jacques Monod encarna esta angustia propia del hombre moderno que, al tiempo que no se resigna a renunciar a la ciencia, reconoce sus tristes resultados: "la antigua alianza se ha roto; el hombre sabe, por fin, que está solo en la inmensidad indiferente del universo, del que ha emergido por azar" (Monod 1985, p. 167); "es muy necesario que el hombre despierte de su sueño milenarista para descubrir su total soledad, su extrañeza radical. Ahora sabe que está al margen del Universo donde debe vivir. Universo sordo a su música, indiferente tanto a sus esperanzas como a sus sufrimientos y crímenes" (Monod 1985, p. 162).
- ⁵ Por ejemplo, Sinaí demostró que un sistema de dos esferas rígidas moviéndose según las leyes de la mecánica en una caja rectangular de paredes perfectamente reflectoras presenta un comportamiento caótico. Sobre teoría del caos desde una perspectiva formal, *cf.* Schuster (1988), Argyris *et. al.* (1994).
- ⁶ Nos referimos aquí a la geometría del espacio de las fases, donde cada punto representa un estado preciso del sistema, y cada trayectoria representa una evolución posible.
- ⁷ En un espacio de las fases de dos variables, x e y , tales que $0 \leq x \leq 1$ y $0 \leq y \leq 1$, la transformación del panadero queda definida por las siguientes ecuaciones deterministas: $x' = 2x$ e $y' = y/2$ para $0 \leq x < 1/2$; $x' = 2x - 1$ e $y' = (y+1)/2$ para $1/2 \leq x \leq 1$. Tales ecuaciones son reversibles, pues al ser resueltas para x e y se obtiene $x = x'/2$ e $y = 2y'$ para $0 \leq y \leq 1/2$; $x = (x'+1)/2$ e $y = 2y' - 1$ para $1/2 \leq y \leq 1$. Estas últimas son idénticas a la versión invertida en el tiempo de las ecuaciones originales, dado que x e y se han intercambiado. Este intercambio es análogo a la inversión de las velocidades, manteniendo invariantes las coordenadas espa-

- ciales, cuando se invierte el signo de la variable t en las ecuaciones de la mecánica clásica.
- 8 En el ejemplo que presenta Prigogine en *EC* (pp. 204-206), con una precisión máxima $\Sigma=1/4$ el sistema alcanza el equilibrio en la cuarta aplicación sucesiva de la transformación del panadero. Pero si, por ejemplo, se disminuye el valor de Σ a $1/8$, el sistema alcanza el equilibrio en la sexta aplicación sucesiva de la transformación. Esto indica que, según la interpretación de Prigogine acerca de la irreversibilidad, el tiempo que un sistema requiere para alcanzar el equilibrio depende de la precisión en la determinación de las condiciones iniciales.
 - 9 Según Prigogine, ésta es la idea implícita en el concepto de estado atractor: "la irreversibilidad es la expresión de tal *atracción*" (*BB*, p. 8).
 - 10 La formulación teórica de Prigogine se basa en los métodos suministrados por los espacios de Hilbert. Un teorema de B.O. Koopman del año 1931 demuestra la posibilidad de utilizar tales métodos para el estudio de sistemas clásicos conservativos.
 - 11 En realidad, W_t es el conjugado hermitico de W_t^+ que representa el proceso de Markov. W_t debe cumplir con ciertas propiedades: (i) debe preservar positividad (si $\rho^* \geq 0$, entonces $W_t \rho^* \geq 0$), es decir, debe convertir distribuciones no negativas -físicamente posibles- en otras distribuciones no negativas; (ii) la distribución de equilibrio ρ_{eq}^* debe ser estacionaria para el proceso de Markov ($W_t \rho_{eq}^* = \rho_{eq}^*$). Cfr. *DD*, p. 9.
 - 12 Las condiciones son: (i) Λ debe preservar positividad (si $\rho \geq 0$, entonces $\rho^* = \Lambda \rho \geq 0$) a fin de convertir distribuciones ρ físicamente posibles en distribuciones ρ^* que también los sean; (ii) Λ debe tener inversa Λ^{-1} ; (iii) Λ debe mantener invariante la distribución de equilibrio ($\rho_{eq}^* = \Lambda \rho_{eq} = \rho_{eq}$), es decir, la descripción del macroestado de equilibrio debe ser la misma en ambas representaciones; (iv) Λ debe mantener invariante el valor de la medida de ρ^* en el espacio de las fases ($\int_{\Gamma} \rho^* d\mu = \int_{\Gamma} \Lambda \rho d\mu$). Cfr. *DD*, p. 10.
 - 13 Estas identidades se obtienen considerando que $\rho^*(t) = \Lambda \rho(t) = \Lambda U_t \rho(0)$ y, al mismo tiempo, $\rho^*(t) = W_t \rho^*(0) = W_t \Lambda \rho(0)$. Por lo tanto, $\Lambda U_t \rho(0) = W_t \Lambda \rho(0)$.
 - 14 La transformación Λ es no unitaria; Batterman (1991, p. 253) analiza desde el punto de vista matemático la relevancia de que Λ sea no unitaria para la ruptura de la simetría temporal. La estrategia general de Prigogine es pasible de diversas objeciones. Las identidades que permiten obtener W_t a partir de U_t y viceversa, sólo se cumplen para $t \geq 0$ y, por lo tanto, no expresan la total equivalencia entre ambas representaciones. Puede incluso demostrarse que la misma evolución reversible U_t subyacente puede ser igualmente representada por cualquiera de dos procesos de Markov asociados con W_t^+ y W_t^- a través de las dos transformaciones Λ^+ y Λ^- temporalmente simétricas entre sí, que dan como resultado las distribuciones ρ^+ y ρ^- ; dichos procesos de Markov conducen al equilibrio para $t \rightarrow +\infty$ y $t \rightarrow -\infty$ respectivamente. A fin de elegir entre ambas representaciones, Prigogine se ve obligado a interpretar el segundo principio como un principio de selección de las condiciones iniciales, convirtiendo su fundamentación de la irreversibilidad en un argumento circular, que asume como premisa lo que pretende probar. El análisis detallado de estas cuestiones excede el alcance del presente trabajo; para un tratamiento pormenorizado, cfr. Karakostas (1996), Lombardi (1999).
 - 15 En términos matemáticos $\|W_t \rho^* - \rho_{eq}^*\|^2 \rightarrow 0$, decreciendo monótonamente con t , para $t \rightarrow +\infty$.

- 16 Dado que la evolución bajo U_t es reversible y cumple el teorema de Liouville, la función $H(\rho) = \int_{\Gamma} \rho \log \rho \, d\mu$ es invariante con el tiempo. La nueva función $H^*(\rho^*) = \int_{\Gamma} \rho^* \log \rho^* \, d\mu$, en cambio, decrece monótonamente con el tiempo hasta que alcanza la distribución de equilibrio.
- 17 Resultados teóricos como los de Gleason y de Kochen y Specker demuestran que la interpretación estadística basada en el concepto de ensemble no puede ser sostenida de una manera consistente con la estructura teórica de la mecánica cuántica; *cf.* Hughes (1994).
- 18 En la formulación de Prigogine, basada en la representación mediante espacios de Hilbert, ρ es un vector en dicho espacio; *cf.* nota 10.

BIBLIOGRAFIA

- Argyris, J., Faust, G., Haase, M.: 1994, *An Exploration of Chaos*, Amsterdam, North-Holland.
- Batterman, R.: 1991, 'Randomness and Probability in Dynamical Theories: on the Proposals of the Prigogine School', *Philosophy of Science* 58, 241-263.
- Boltzmann, L.: 1986, *Escritos de Mecánica y Termodinámica*, Madrid, Alianza Editorial.
- Gibbs, J.W.: 1960, *Elementary Principles in Statistical Mechanics*, New York, Dover (1ª ed. 1902).
- Hughes, R.I.G.: 1994, *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge MA, Harvard University Press (1ª ed. 1989).
- Karakostas, V.: 1996, 'On the Brussels School's Arrow of Time in Quantum Theory', *Philosophy of Science* 63, 374-400.
- Lombardi, O.: 1998, 'La Teoría del Caos y el Problema del Determinismo', *Diálogos* 72.
- Lombardi, O.: 1999, 'El Problema de la Irreversibilidad: Prigogine y la Transformación del Panadero', *Revista Latinoamericana de Filosofía* XXV, N° 1, a aparecer en otoño de 1999.
- Misra, B., Prigogine, I.: 1981, 'Time, Probability and Dynamics', in C.W. Horton, L.E. Reichl, V.G. Szebehely (eds.): *Proceedings of the Workshop on Long-Time Predictions in Nonlinear Conservative Dynamical Systems*, New York, John Wiley & Sons, pp. 21-43. Citado como "TPD".
- Misra, B., Prigogine, I.: 1983, 'Irreversibility and Nonlocality', *Letters in Mathematical Physics* 7, 421-429. Citado como "IN".
- Misra, B., Prigogine, I., Courbage, M.: 1979, 'From Deterministic Dynamics to Probabilistic Descriptions', *Physica A*, 98A, 1-26. Citado como "DD".
- Monod, J.: 1985, *El Azar y la Necesidad*, Buenos Aires, Hyspamérica (1ª ed. 1970).
- Nicolis, G., Prigogine, I.: 1989, *Exploring Complexity. An Introduction*, New York, W.H. Freeman and Company. Citado como "EC".
- Prigogine, I.: 1983, *¿Tan Solo una Ilusión? Una Exploración del Caos al Orden*, Barcelona, Tusquets (colección de artículos aparecidos originalmente entre 1972 y 1982). Citado como "ST".
- Prigogine, I.: 1980, *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences*, New York, W.H. Freeman and Company. Citado como "BB".
- Prigogine, I., Stengers, I.: 1984, *Order Out of Chaos. Man's New Dialogue with Nature*, New York, Bantam Books. Citado como "OC".

- Prigogine, I., Stengers, I.: 1990, *La Nueva Alianza. Metamorfosis de la Ciencia*, Madrid, Alianza Editorial (1ª ed. 1979, 1ª ed. castellana 1983). Citado como "NA".
- Prigogine, I., Stengers, I.: 1991, *Entre el Tiempo y la Eternidad*, Buenos Aires, Alianza Editorial (1ª ed. 1988, 1ª ed. castellana 1990). Citado como "TE".
- Putnam, H.: 1988, *Razón, Verdad e Historia*, Madrid, Tecnos (1ª ed. 1981).
- Schuster, H.: 1988, *Deterministic Chaos*, Weinheim, VCH (1ª ed. 1985).
- Sklar, L.: 1993, *Physics and Chance*, Cambridge, Cambridge University Press.

Olimpia Lombardi es Ingeniera en Electrónica y Licenciada en Filosofía (Orientación Lógica y Epistemología, Universidad de Buenos Aires). Profesora Titular, Maestría en Educación e Informática, Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Autora de un libro (ed. Eudeba, en prensa) y de artículos sobre aspectos filosóficos de la obra de Prigogine y sobre teoría del caos. Autora de artículos sobre epistemología y educación en ciencias. Actualmente investiga el tema del determinismo en mecánica estadística, teoría del caos y mecánica cuántica.